

EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT PARA ESTUDO DE ESCOAMENTO NÃO PERMANENTE APLICADO AO DAM BREAK SIMPLIFICADO

Palavras-Chave: Dam Break, Modelagem, Mapeamento Sistemático da Literatura.

Autores:

Letícia Ramos de Andrade – FECFAU

Prof. Dr. André Luís Sotero S. Martim (orientador), Dep. Recursos Hídricos - FECFAU

INTRODUÇÃO:

As barragens são estruturas hidráulicas fundamentais para o armazenamento e uso racional da água, com finalidades como abastecimento, irrigação, controle de cheias e geração de energia. No entanto, o rompimento dessas estruturas pode causar grandes desastres graves, como os ocorridos em Mariana em 2015, que com o seu rompimento, os efeitos dos rejeitos no mar serão sentidos por 100 anos, segundo ambientalistas, e em Brumadinho 4 anos depois, segundo a Agência Nacional de Mineração, a barragem não apresentava pendências documentais, bem como era considerada inativa.

A Lei nº 12.334/2010 foi criada para estabelecer diretrizes de segurança para barragens, priorizando a proteção da vida e do meio ambiente. A modelagem computacional tem sido amplamente utilizada no Brasil para simular cenários de rompimento, empregando ferramentas como HEC-RAS e RiverFlow 2D, que auxiliam na previsão de áreas inundadas, tempo de chegada da onda e impactos esperados.

A pesquisa propõe uma revisão sistemática da literatura sobre modelagem de rompimentos no Brasil, com foco nas metodologias aplicadas, nos desafios enfrentados e na contribuição para a gestão de riscos.



Figura 1: área prevista para a construção do reservatório

Como estudo de caso, foi escolhida a Barragem do Ribeirão Pirai, localizada entre Salto e Itu (SP), ainda em fase de construção. A barragem visa garantir o abastecimento hídrico regional e conta com capacidade de 10 milhões de m³. A revisão servirá para orientar a escolha de modelos computacionais adequados à análise de cenários futuros.

METODOLOGIA:

Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura técnica brasileira sobre modelagem computacional de rompimento de barragens, com o objetivo de embasar a futura aplicação no caso da

Barragem do Ribeirão Pirai. A metodologia segue os princípios do Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL), conforme Kitchenam (2007), e tem como foco identificar tendências, lacunas e práticas consolidadas na área.

A revisão foi orientada por quatro perguntas-chave:

- Quais softwares foram aplicados?
- Quais as dimensões das barragens analisadas?
- Quais dados foram utilizados?
- Quais equações governantes foram adotadas?

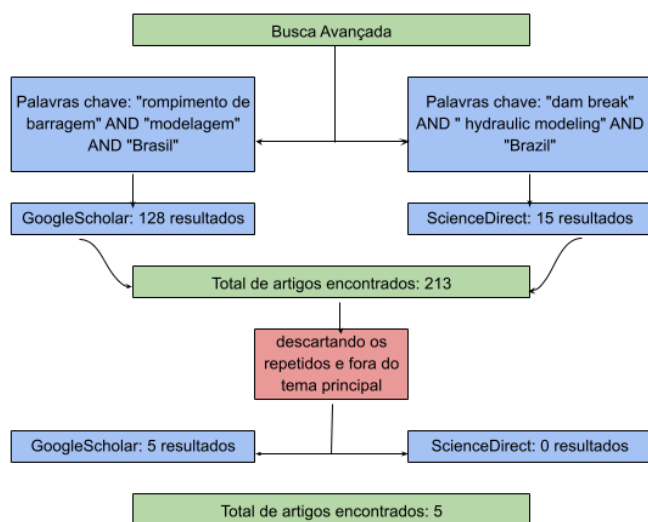


Figura II: organograma do direcionamento da pesquisa

Os estudos foram selecionados com base em strings de busca e critérios de inclusão (como data de publicação a partir de 2021). Foi observada uma escassez de publicações recentes sobre o tema, especialmente em barragens em fase de projeto e fora de grandes polos industriais, o que reforça a relevância deste trabalho.

Para a análise e seleção dos artigos, foram considerados apenas estudos brasileiros com aplicações práticas em barragens localizadas no país, que utilizaram modelagem computacional com base em dados físicos, topográficos e hidráulicos, empregando equações como as de Saint-Venant e Navier-Stokes. As fontes incluíam repositórios de universidades (UFSC, UFRGS, UFRJ, UFU), a

ABRHydro e outras bases acadêmicas.

As principais ferramentas utilizadas nas pesquisas analisadas foram:

- HEC-RAS 1D/2D: Popular pela sua acessibilidade, integração com dados topográficos e validação prática.
- Método dos Volumes Finitos (CFD): Oferece maior controle numérico em simulações de escoamentos idealizados.
- SHP (Smoothed Particle Hydrodynamics): Abordagem lagrangeana eficaz para simular rejeitos com comportamento não newtoniano em geometrias complexas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados obtidos nessa pesquisa foram dispostos em forma de tabelas, fazendo um comparativo entre as ferramentas computacionais utilizadas nos artigos mencionados.

Tabela 1: Ferramentas encontradas nos artigos.

Estudo / Autor	Ferramenta Computacional	Característica da Barragem Simulada	Equações Abordagens Numéricas	Dados de Entrada	Resultados Gerados

Tucci & Collischonn (1997)	DAMBRK (1D)	Hipotética, terra, altura de 19,5 m	Equações de Saint-Venant (1D)	Curva cota-volume, geometria da brecha, tempo de abertura	Mancha de inundação, tempo de onda, hidrogramas
Fabiani & Ota (2013)	Volumes Finitos (CFD 1D)	Barragem genérica, escoamento idealizado	Saint-Venant (forma conservativa); UDS e CDS	Condições iniciais e de contorno, profundidade de jusante	Perfil de onda de cheia, influência da malha de discretização
Wilpert (UFSC, 2022)	HEC-RAS 2D	Barragem Hipotética de contenção (SC), 12 m	Saint-Venant 2D	MDT, geometria da brecha, rugosidade de Manning	Mancha de inundação, tempo de chegada da onda
Silva (UFRGS, 2022)	HEC-RAS 2D + ArcGIS	Lomba do Sabão (RS), brecha hipotética	Saint-Venant 2D	MDT LiDAR e SRTM, delimitação da brecha, cota-volume	Comparação entre modelos de terreno, mancha de inundação
Brandão (UFRJ, 2023)	HEC-RAS 2D	Brumadinho (MG), rejeitos, 86 m	Saint-Venant 2D ajustado a terreno real	SRTM, dados da Vale, estimativa da brecha	Mancha de inundação, tempo de onda, áreas afetadas.
Ferreira (UFU, 2025)	SPH (Lagrangeano)	Genérica, rejeitos de mineração	Navier-Stokes com partículas (SPH); fluido não newtoniano	Densidade, viscosidade, geometria do reservatório, condições de contorno	Simulação de rejeitos, interação fluido-estrutura, tempo e alcance da onda
Almeida & Franco (1994)	Teórico (sem simulação computacional)	Geral (sem estudo de caso específico)	Saint-Venant com e sem atrito; soluções analíticas	Parâmetros hidráulicos genéricos	Discussão conceitual da propagação da ruptura e formas de solução

A partir da análise, pode-se ver que na tabela II apresenta-se uma comparação entre essas ferramentas computacionais para simular processos de Dam Break, destacando as vantagens e limitações de cada modelo.

Tabela 2: comparação entre as ferramentas.

Ferramenta	Vantagens	Limitações	Mais indicada para...
HEC-RAS	Fácil de usar, amplamente validado, ótimo para topografias conhecidas	Pouco preciso para rejeitos ou rupturas complexas	Estudos técnicos, comparações entre cenários, impacto hidráulico
Vol. Finitos (CFD)	Alta precisão, boa para simular transições rápidas	Mais difícil de configurar, exige conhecimento numérico	Ondas rápidas em canais simples, análises acadêmicas
SPH	Modela rejeitos, fluidos complexos, rompimentos reais	Exige programação e validação	Barragens de rejeitos, ruptura realista em 3D

Análítica/Teórica	Simples, rápida, boa como base teórica	Não simula cenários reais	Educação, modelagem preliminar, comparações rápidas
--------------------------	--	---------------------------	---

Aplicando no estudo de caso, sendo ele, a Barragem do Ribeirão Piraí, com base na revisão sistemática, o HEC-RAS 2D seria a melhor escolha para modelar o rompimento da Barragem do Ribeirão Piraí, por sua capacidade de representar cenários reais a partir de dados topográficos e hidráulicos. A modelagem será exploratória e preventiva, já que a barragem ainda está no processo de construção, mas já existem dados preliminares importantes como:

- Modelo Digital de Elevação (MDE) com base no SRTM e refinamentos locais;
- Geometria estimada da brecha de ruptura (largura e tempo de abertura);
- Parâmetros de rugosidade definidos conforme uso e cobertura do solo;
- Curva cota-volume simulada com base na topografia da bacia.

A partir disso, serão gerados cenários variados de falha, visando produzir, os mapas de mancha de inundação; estimativas do tempo de chegada da onda de cheia; e a avaliação preliminar dos impactos a jusante. Esses resultados serão comparados com os achados da revisão para avaliar a adequação, confiabilidade e limitações do uso do HEC-RAS 2D em barragens em fase de projeto, ou as que já foram construída mas sem previsão da formação da brecha de ruptura, no contexto brasileiro.

CONCLUSÕES:

A revisão sistemática revelou uma grande lacuna na literatura brasileira sobre o uso de ferramentas de simulação de rompimento de barragens (Dam Break), especialmente em obras ainda em fase de implantação, como a Barragem do Ribeirão Piraí. Entre os softwares analisados, o HEC-RAS (nas versões 1D e 2D) destacou-se como a ferramenta mais amplamente utilizada, devido à sua base nas equações de Saint-Venant, qualidade técnica, versatilidade e integração com plataformas como ArcGIS e HEC-HMS.

Essas características justificam a escolha do HEC-RAS como base para a modelagem computacional de cenários de risco, sendo uma opção robusta e confiável para simulações preventivas em barragens em construção.

BIBLIOGRAFIA

BERMÚDEZ, Luis Fernando Murillo; MARTIM, André Luis Sotero Salustiano; FAIS, Laura Maria Canno Ferreira; DALFRÉ FILHO, José Gilberto. **Revisão sistemática da literatura de técnicas ópticas como medida indireta de monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão no Brasil**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS – ENES, 14., 2020, Campinas. Anais. Porto Alegre: ABRHidro, 2020. ISSN 2359-2141. Disponível em: Anais ABRHidro – ENES 2020. Acesso em: 20 jul. 2025.

BIOESFERA Consultoria Ambiental. **Relatório Ambiental Preliminar – RAP da Barragem do Ribeirão Piraí**. 2022. Relatório técnico elaborado para o Consórcio Intermunicipal do Ribeirão Piraí, visando o licenciamento ambiental do empreendimento de regularização hídrica. Disponível em: Consórcio Piraí – RAP Final. Acesso em: 20 mai. 2025.

BRANDÃO, Mariana Ribeiro de Lima. **Modelagem hidrodinâmica uni e bidimensional aplicada ao rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro. Disponível em: Pantheon UFRJ. Acesso em: 20 jul. 2025.

GRESSLER, Marcelle; FAN, Fernando Mainardi; TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura. **Alternativas para simulação de rompimento de barragem de rejeitos com propagação de fluidos hiperconcentrados no software HEC-RAS: uma análise comparativa.** In: XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - 2023/ ISSN 2318-0358, ABRHidro, 2023. Disponível em: Lume UFRGS. Acesso em: 21 jul. 2025.

JORNAL DE ITU. **Barragem do Pirai: prefeitos assinam ordem de serviço e prometem obras para este ano.** Itu, 24 nov. 2023. Disponível em: Jornal de Itu – Barragem do Pirai. Acesso em: 23 jun. 2025.

MSL - KITCHENHAM, B. A. (2007) **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering.** Version 2.3, EBSE Technical Report, Keele University and University of Durham, UK.

PETERSEN, K.et al. (2015) **Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update.** Information and Software Technology, v. 64, p. 1–18.

USACE – US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual version 5.0.** Davis: Institute of Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2016. Acesso em: mar. 2025